

Mortero acumulador de energía mediante parafina microencapsulada

Autores

Vicente Zetola Vargas: Universidad Católica del Norte
Alfonso García Santos. Universidad Politécnica de Madrid
Francisco Javier Neila González: Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

En la construcción se puede almacenar calor a través de calor sensible y calor latente. El almacenamiento por calor latente es menos utilizado en aplicaciones arquitectónicas que el calor sensible, pero su capacidad de acumulación es mucho mayor. La utilización de calor latente a través de materiales de cambio de fase (PCM), puede producir mejoras en el acondicionamiento térmico y reducir el consumo de energía por calefacción en los edificios. Por su posibilidad de uso en morteros de cemento, las parafinas microencapsuladas aparecen como una buena alternativa tecnológica dentro de los materiales de construcción. Existe un grupo de problemas relacionados con el cambio de comportamiento que experimenta el mortero dependiendo de las cantidades incorporadas de PCM microencapsulado. En el presente trabajo se expone su aplicación a morteros de cemento en cantidades de 5, 10 y 20 %, y relaciones agua/cemento de 0,50; 0,70 y 0,90. Los resultados permiten ver los efectos en las propiedades del mortero, observándose disminución de resistencia y densidad, así como también cambios en el comportamiento de mezclas en estado fresco de mortero con PCM. Agregado en la mezcla, permite acumular mayores cantidades de energía sin aumentar el espesor de la capa de mortero.



Mortar energy storage using microencapsulated paraffin

Authors

Vicente Zetola Vargas: Universidad Católica del Norte
Alfonso García Santos. Universidad Politécnica de Madrid
Francisco Javier Neila González: Universidad Politécnica de Madrid

Abstract

In the construction, it can store heat by sensible heat and latent heat. Latent heat storage is less used in architectural applications than the sensible heat, but the storage capacity is much higher. The use of latent heat through phase change material (PCM) can produce improvements in the thermal conditioning and to reduce energy consumption by heating in buildings. On the possibility of use in cement mortars, microencapsulated paraffins appear as a good alternative technology in construction materials. There is a group of problems related to behavior change experienced by the mortar depending on the amounts entered microencapsulated PCM. In the present paper describes its application to cement mortars amounts of 5, 10 and 20%, and water/cement ratios of 0,50; 0,70 and 0,90. The results allow us to see the effects on the properties of mortar, showing decreased strength and density, as well as changes in the behavior of mixtures in fresh mortar with PCM. If it added into the mixture, this allows accumulating greater amounts of energy without increasing the thickness of the mortar layer.



fcfm

Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Mortero acumulador de energía mediante parafina microencapsulada

1. Introducción

1.1 El almacenamiento térmico en la construcción

En los últimos años los sistemas de almacenamiento de energía térmica están suscitando un gran interés ya que permiten adaptar los periodos de suministro a los de demanda energética, por lo que constituyen un gran potencial para la mejora de la eficiencia energética (Oliver A., 2009).

Hay básicamente tres posibilidades de almacenamiento de energía térmica que se investigan en la actualidad (Zalba, 2002): Calor latente, calor sensible y reacción termoquímica. El calor latente por materiales de cambio de fase es mucho menos ocupado en aplicaciones arquitectónicas que el calor sensible, pero su capacidad de acumulación es mucho mayor (Neila, 2004).

Los materiales de cambio de fase líquido-sólido más comunes en el rango de temperaturas 20 °C y 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos, (Oliver, 2009).

El almacenamiento de energía en las paredes, el techo y el piso de los edificios se puede mejorar mediante la incorporación de PCM, aumentando el confort térmico, al aumentar la inercia térmica, disminuir los cambios de temperatura del aire interior y mejorar el rendimiento térmico (Xin, YinPing, Wei, RuoLang, & Qunli, 2009) (Wang, Shi, Xia, Zhang, & Feng, 2012).

Los PCM se pueden incorporar en los materiales de construcción mediante aplicación directa, inmersión, encapsulación (macrocápsulas y microcápsulas) y en tableros laminados (Zhang, Zhou, Lin, Zhang, & Di, 2007).

Varios autores han publicado revisiones de lo investigado en la aplicación de los PCM en la construcción ((Zhang et al., 2007), (Kuznik, David, Johannes, & Roux, 2011), (Mehling & Cabeza, 2008), (Xin et al., 2009)).

1.2 Aplicaciones de PCM microencapsulados en el hormigón

Las microcápsulas son pequeños recipientes, esféricos o asimétricos, de tamaños variables, que empaquetan el material base (PCM) con una cáscara dura, pero que tolera los cambios de volumen. En general pueden ser microencapsulados materiales sólidos, líquidos y gases (Tyagi, Kaushik, Tyagi, & Akiyama, 2011). Se agregan como

ingredientes activos microencapsulados en materiales como cemento, cal, hormigón, mortero, mármol artificial, selladores, pinturas y otros revestimientos. En el hormigón se pueden usar como reductor del calor de hidratación, para el control microbiano y el control de temperatura.

Lee, Hawes, Banu, & Feldman, (2000) investigan el rendimiento térmico de bloques de hormigón impregnados con PCM. En este trabajo estudian los efectos en la alcalinidad, temperatura, tiempo de inmersión y la dilución del PCM durante el proceso de impregnación.

Bentz & Turpin, (2007) presentan tres posibles aplicaciones de áridos ligeros impregnados con PCM en el hormigón, y concluyen que los PCM pueden mejorar el rendimiento en varias aplicaciones. Se indica que los áridos impregnados con PCM se pueden utilizar para limitar el aumento de la temperatura de hormigones masivos.

Cabeza et al., (2007), realizan pruebas de hormigón con 5 % (respecto al peso de la mezcla) de PCM microencapsulados comerciales, con un punto de fusión de 26 ° C y una entalpía de cambio de fase de 110 kJ/kg. Introducen PCM microencapsulados en hormigón, utilizado para construir un cubículo de tamaño pequeño, y otra con hormigón normal (Figura 1). También evalúan un muro Trombe. Concluyen que el cubículo con PCM tiene mayor inercia térmica que el cubículo de referencia, y que alcanzan temperaturas máximas alrededor de 2 horas más tarde que el cubículo sin PCM. Todos los diferentes casos estudiados en los experimentos tenían sus ventajas y desventajas, dependiendo del mes o la temporada.



Figura 1. Cubículos de prueba PCM. A la derecha con muro Trombe (Cabeza et al. 2007)

Hunger, Entrop, Mandilaras, & Founti, (2009), estudian PCM en mezclas de hormigón autocompactante. Indican que se puede disminuir la temperatura de máxima asociada a la hidratación en un 28,1 %, con un contenido del 5 % de PCM. Sin embargo, la velocidad de calentamiento no se puede cambiar. La incorporación de PCM disminuye la resistencia, la conductividad térmica y aumenta la capacidad de almacenar calor. Indican que hay rompimiento parcial de microcápsulas y que a pesar de esto, una gran

parte de la cera está aún presente en el hormigón y podrían estar en funcionamiento, siendo capaces de almacenar calor latente. Baja la resistencia a compresión del hormigón, sin embargo sigue cumpliendo las exigencias de la mayoría de las aplicaciones estructurales.

Felix & Aguilar, (2009) estudian las propiedades mecánicas de un mortero de cemento con la incorporación del 20 %, 30 % y 40 % (respecto al peso de la mezclas) de microcápsulas de PCM. El objetivo es encontrar el porcentaje máximo a incorporar en un mortero de cemento para uso en el revestimiento interior de paredes. Con la incorporación de las microcápsulas de PCM la resistencia del mortero de referencia (0% de PCM) se debe mantener. Los resultados de la primera serie de pruebas muestran una importante disminución de las resistencias mecánicas al incorporar microcápsulas con PCM y no fue posible mantener la resistencia de referencia. En la segunda serie de pruebas la composición del mortero fue modificada mediante la adición de 10 % de cemento CEM II 52,5. Los resultados muestran que la incorporación del 20 % y 30 % de PCM disminuyen las resistencias mecánicas, pero los valores obtenidos están aún dentro de los requisitos de la norma europea. La incorporación de 20% de microcápsulas con PCM, permite mantener la resistencia del mortero de referencia.

2. Desarrollo

En este trabajo se ha abordado el estudio de microcápsulas con núcleo de parafina incorporadas en morteros de cemento Portland. Que de acuerdo a lo visto en las investigaciones realizadas por otros autores, modifica las características del hormigón o mortero normal.

Existe entonces, un grupo de problemas relacionados con el cambio de comportamiento que experimenta el mortero de cemento dependiendo de las cantidades incorporadas de PCM microencapsulado. Las microcápsulas con parafina pueden encontrarse en dispersión acuosa o en polvo.

2.1 Objetivos del estudio

Conocer el material es fundamental para ver posteriormente su aplicación, por lo que este trabajo se enfoca en conocer algunas características del mortero con PCM.

Para este trabajo se han definido los siguientes objetivos:

- Verificar el comportamiento de los PCM en la mezcla de morteros de cemento Portland en cuanto a trabajabilidad, densidad y resistencia.
- Establecer la proporción óptima de PCM microencapsulado en morteros.
- Estimar teóricamente la capacidad de almacenamiento

Para cumplir estos objetivos en primer lugar se realizan ensayos preliminares para caracterizar a los materiales a utilizar y poder realizar las dosificaciones. En segundo lugar, y una vez definidas las dosificaciones se realizan los ensayos físico-mecánicos. También se hacen pruebas para verificar el comportamiento de las microcápsulas durante el proceso de mezclado del mortero.

2.2 Materiales utilizados en los ensayos

Para la realización de las pruebas con morteros se han utilizado diversos materiales los que fueron elegidos en general por su disponibilidad y por reunir las condiciones requeridas.

a) Cemento

Se usa cemento Tipo CEM I 42,5 R, según norma UNE-EN 197-1, fabricado por Cementos Portland Valderrivas, Fábrica Hontoria, Palencia. Las características principales del cemento, proporcionados por el fabricante: Densidad 3050 kg/m^3 , resistencia habitual a compresión 28 días 57 MPa. Superficie específica Blaine $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$.

b) Arena

Se utiliza arena de río cuya granulometría se muestra en Tabla 1. La granulometría indica que es una arena gruesa con baja cantidad de material bajo 0,5 mm, y poco fino menor a 0,063 mm. Su densidad real es de 2620 kg/m^3 .

Tabla 1. Granulometría de arena	
Tamiz en mm	% que pasa
8	100
4	96
2	77
1	47
0,5	18
0,25	5
0,125	1

c) Agua

Se utiliza agua potable.

d) Aditivo superplastificante

Se utiliza aditivo superplastificante ADVA Flow 340, fabricado por Grace Construction Products. Es un aditivo de última generación a base de polímeros de carboxilatos sintéticos modificados. Este aditivo está indicado para hormigón autocompactante, pero en esta ocasión se utiliza como superplastificante reductor de agua. De acuerdo a información entregada por el fabricante el contenido de sólidos es de 32 %, su densidad es de 1.070 kg/m³. Para las pruebas se utiliza cantidad máxima que aparece en la cartilla de recomendaciones del fabricante, 1 % del peso del cemento.

e) Microcápsulas de PCM con núcleo de parafina

Para las pruebas se utiliza parafina microencapsulada disponible en el mercado, Micronal DS 5008 X, polvo seco, compuesto por una mezcla de parafina, microencapsuladas con polimetil metacrilato altamente entrecruzado, sin formaldehído. El producto tiene un pH de entre 7,5 a 8,5. Las microcápsulas tienen de 5 a 10 µm, agrupadas en partículas de 0,1 a 0,3 mm. Se usa para los ensayos una densidad de 980 kg/m³ (Oliver, A., 2009).

2.3 Plan experimental

2.3.1 Ensayos físico-mecánicos

a) Procedimiento.

Para verificar el comportamiento de los PCM en la mezcla de morteros se realizaron ensayos de trabajabilidad, densidad y resistencia a compresión.

Se confeccionan morteros con los diferentes contenidos de microcápsulas de PCM, de acuerdo a UNE EN 196-1, con algunas modificaciones derivadas de las dificultades de la incorporación de los materiales.

Se mide trabajabilidad mediante determinación de la consistencia de mortero fresco mediante la mesa de sacudidas, con ensayo adaptado de la norma UNE-EN 1015-3. Se modifica tipo de pisón utilizado para los ensayos, aplicándose 35 golpes por capa con pisón de madera según norma chilena NCh2257/1.Of96.

De la misma muestra se toma una parte para medir la densidad aparente del mortero fresco. Se utiliza un método similar a UNE-EN 1015-6, pero con menor cantidad de muestra. Se usa placa de vidrio en la superficie de medida volumétrica, para evitar distorsiones en la medida del volumen.

Se procedió a rotura a compresión de probetas de acuerdo a UNE-EN 196-1 a 7 días y a 28 días.

b) Plan de ensayos físicos y mecánicos.

Para cubrir un mayor número de posibilidades y así determinar proporción óptima desde el punto de vista físico se realizaron las mezclas que se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Mezclas ensayadas				
Mezcla de prueba		% PCM		Relación W/C
N°	Identificación	Respecto al peso del cemento	Respecto al peso total de muestra	
1	M0(0,5)	0	0,0	0,50
2	M5(0,5)	21,5	5,0	0,50
3	M10(0,5)	33,0	10,0	0,50
4	M20(0,5)	41,0	20,0	0,50
5	MM(0,5)	54,0	28,0	0,50
6	M0(0,7)	0	0,0	0,70
7	M5(0,7)	30,0	5,0	0,70
8	M10(0,7)	46,0	10,0	0,70
9	M20(0,7)	63,3	20,0	0,70
10	MM(0,7)	63,3	20,0	0,70
11	M0(0,9)	0	0,0	0,90
12	M5(0,9)	38,5	5,0	0,90
13	M10(0,9)	59,0	10,0	0,90
14	M20(0,9)	75,5	20,0	0,90
15	MM(0,9)	81,2	21,9	0,90
16	MSA(0,9)	104,6	35,6	0,90

En general se identifican las muestras con la letra M. Las muestras MM, corresponden a mezclas con un mínimo de 500 kg de arena, este valor se definió debido a que los morteros necesitan una cantidad de arena mínima en la mezcla para asegurar una trabajabilidad aceptable. Algunas mezclas no se realizaron: las muestras N° 5 y 15 tenían menos de 500 kg de arena y la mezcla N° 9 coincidía dosificación con la N° 10. La muestra MSA, no tiene arena y representa el máximo contenido de PCM a incorporar para los ensayos realizados. Este contenido podría subir si se consigue bajar la cantidad de agua y de cemento. El porcentaje de microcápsulas se adiciona como parte de los áridos, por lo que cuando este aumente, disminuirá la cantidad de arena.

Las dosificaciones teóricas se muestran en la Tabla 3. Se necesitaron igual cantidad de pruebas previas, a pesar de esto al momento de hacer las mezclas se presentaron algunos pequeños cambios, lo que será indicado en los resultados.

Tabla 3. Dosificaciones teóricas para 1 m³							
Mezcla de prueba		Cantidades en peso, kg					Densidad teórica de mezcla kg/m ³
N°	Identificación	Cemento	PCM	Arena	Agua	Aditivo Super plastificante	
1	M0(0,5)	447	0	1517	220	4,47	2.180
2	M5(0,5)	467	100	1205	230	4,67	2.000
3	M10(0,5)	547	181	815	270	5,47	1.810
4	M20(0,5)	727	298	106	360	7,27	1.490
6	M0(0,7)	318	0	1632	220	3,18	2.170
7	M5(0,7)	332	100	1326	230	3,32	1.990
8	M10(0,7)	389	179	959	270	3,89	1.800
9	M20(0,7)	475	301	400	330	4,75	1.510
11	M0(0,9)	246	0	1695	220	2,46	2.160
12	M5(0,9)	257	99	1394	230	2,57	1.980
13	M10(0,9)	302	178	1039	270	3,02	1.790
14	M20(0,9)	391	295	438	350	3,91	1.470
16	MSA(0,9)	413	432	0	370	4,13	1.210

2.3.2 Ensayos tendientes a verificar comportamiento de microcápsulas

Se observa como las partículas que contienen las microcápsulas reaccionan al contacto con el agua y la mezcla. Se observa con microscopio óptico, como las partículas se van disgregando. Se analiza el comportamiento de las microcápsulas de PCM de parafina con el fin de definir si hay ruptura durante la mezcla del mortero. Se prepara muestra con 20 % de PCM, con tres minutos de mezcla. Posteriormente se agrega un litro de agua y se mezcla cuidadosamente, con el fin de diluir la mezcla, se deja reposar una semana, formándose una capa que contiene PCM, se obtienen muestras de PCM de esta capa y se observa en el microscopio óptico.

2.4 Resultados y análisis obtenidos

2.4.1 Resultados características físicas y mecánicas

Al confeccionar los morteros se registran algunas modificaciones debido al ajuste de agua que fue necesario realizar en algunas muestras, las dosificaciones finalmente utilizadas se entregan en la Tabla 4.

Tabla 4. Dosificación por m³								
Mezcla de prueba		Cantidades en peso corregidas , kg						Relación W/C
N°	Identificación	PCM %	Cemento	PCM	Arena	Agua	Aditivo Super plastificante	
1	M0(0,5)	0%	447	0	1517	220	4,5	0,50
6	M0(0,7)	0%	318	0	1632	220	3,2	0,70
11	M0(0,9)	0%	246	0	1695	220	2,5	0,90
2	M5(0,5)	5%	574	102	1078	249	3,9	0,44
7	M5(0,7)	5%	332	100	1326	230	3,3	0,70
12	M5(0,9)	5%	257	99	1394	230	2,6	0,90
3	M10(0,5)	10%	546	180	806	270	5,5	0,50
7	M10(0,7)	10%	389	179	950	270	3,9	0,70
13	M10(0,9)	10%	302	178	1030	270	3,0	0,90
4	M20(0,5)	20%	709	291	103	384	7,3	0,55
8	M20(0,7)	20%	466	295	393	349	4,8	0,76
14	M20(0,9)	20%	391	295	438	350	3,9	0,90
16	MSA(0,9)	34%	388	406	0	411	4,1	1,07

Los ensayos de densidad de mortero fresco y escurrimiento en mesa de sacudidas se muestran en la Tabla 5, además se muestra la diferencia entre ambas medidas. Las densidades del mortero endurecido se muestran en la Tabla 6.

Las resistencias a compresión se muestran en la Tabla 7.

Tabla 5. Ensayos en mortero fresco

Mezcla de prueba		Densidades			Escurecimiento mm
N°	Identificación	Teórica kg/m ³	Mortero fresco kg/m ³	% diferencia r/ a densidad teórica	
1	M0(0,5)	2.190	2.190	0,2%	154
6	M0(0,7)	2.170	2.110	-2,8%	113
11	M0(0,9)	2.160	2.090	-3,9%	109
2	M5(0,5)	2.010	2.040	1,6%	198
7	M5(0,7)	1.990	2.020	1,6%	143
12	M5(0,9)	1.980	2.000	0,9%	140
3	M10(0,5)	1.810	1.800	-0,2%	130
7	M10(0,7)	1.790	1.830	1,9%	197
13	M10(0,9)	1.780	1.820	1,8%	195
4	M20(0,5)	1.490	1.460	-1,7%	165
8	M20(0,7)	1.500	1.480	-1,6%	168
14	M20(0,9)	1.470	1.470	0,0%	174
16	MSA(0,9)	1.200	1.190	-1,0%	143

Tabla 6. Densidades mortero fresco y endurecido

Mezcla de prueba		Densidades		
N°	Identificación	Teórica kg/m ³	Mortero fresco kg/m ³	Mortero endurecido 28 días kg/m ³
1	M0(0,5)	2.190	2.190	2.240
6	M0(0,7)	2.170	2.110	2.050
11	M0(0,9)	2.160	2.090	2.070
2	M5(0,5)	2.010	2.040	2.010
7	M5(0,7)	1.990	2.020	1.970
12	M5(0,9)	1.980	2.000	1.910
3	M10(0,5)	1.810	1.800	1.800
7	M10(0,7)	1.790	1.830	1.770
13	M10(0,9)	1.780	1.820	1.740
4	M20(0,5)	1.490	1.460	1.430
8	M20(0,7)	1.500	1.480	1.480
14	M20(0,9)	1.470	1.470	1.470
16	MSA(0,9)	1.200	1.190	1.100

Tabla 7. Ensayos en mortero endurecido			
Mezcla de prueba		Resistencia a compresión, MPa	
N°	Identificación	7 días	28 días
1	M0(0,5)	41,9	49,0
6	M0(0,7)	13,9	20,3
11	M0(0,9)	11,2	15,0
2	M5(0,5)	29,1	37,3
7	M5(0,7)	13,9	19,2
12	M5(0,9)	9,4	14,1
3	M10(0,5)	19,3	25,0
7	M10(0,7)	12,3	16,2
13	M10(0,9)	8,3	14,2
4	M20(0,5)	14,8	21,9
8	M20(0,7)	10,4	15,0
14	M20(0,9)	8,2	12,2
16	MSA(0,9)	6,7	8,9

2.4.3 Análisis de resultados

2.4.3.1 Trabajabilidad

En el Gráfico 1 y Tabla 8. Se puede apreciar el cambio en la cantidad de agua en la mezcla a medida que aumenta las microcápsulas. El gráfico está basado en valores promedios para cada porcentaje de PCM utilizado.

Tabla 8. Resultados promedios				
% de PCM	PCM promedio, kg	Cto promedio, kg	Agua promedio, litro	Escurecimiento promedio, cm
0%	0	337	220	12,5
5%	100	388	236	16,0
10%	179	413	270	17,4
20%	293	522	361	16,9
34%	406	388	411	14,3

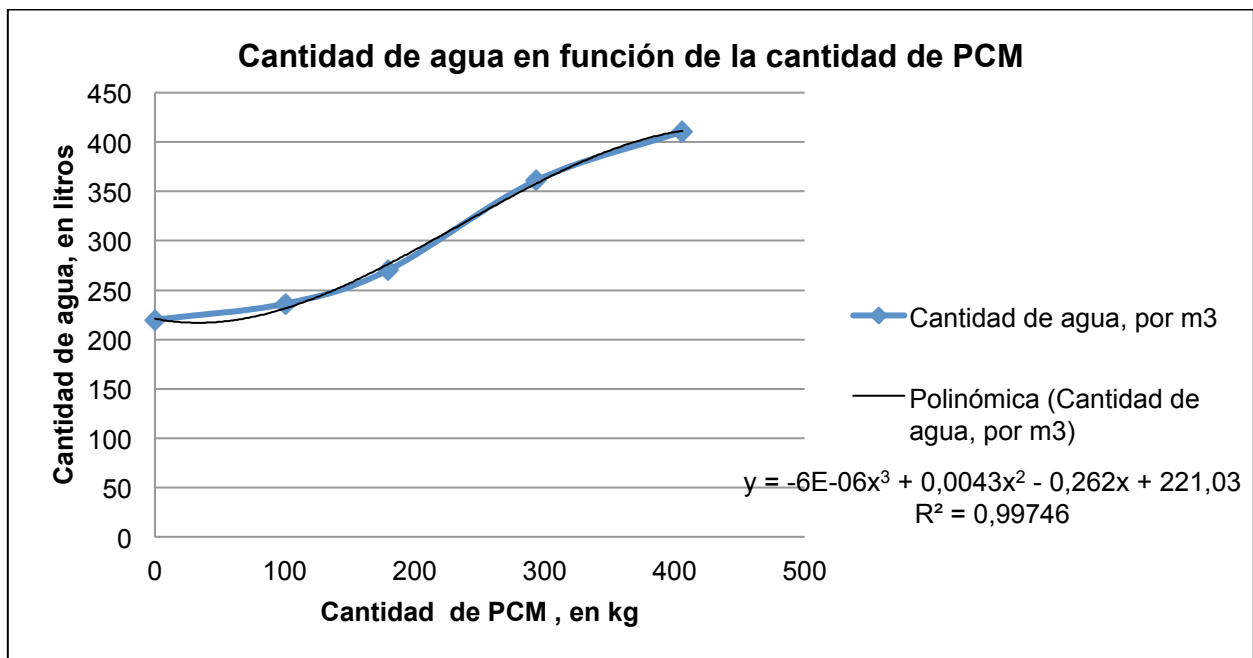


Gráfico 1. Cantidad de agua en función de la cantidad de PCM

El aumento de agua hace que las dosificaciones requieran cada vez más cemento para alcanzar resistencias mayores.

El escurrimiento puede variar respecto al promedio indicado, disminuyendo cuando se aumenta el contenido de cemento. Si bien los valores entregados no son exactos dan una buena aproximación del contenido de agua en función del contenido de PCM para un mortero. Estos datos entregan antecedentes útiles para la aplicación.

El mortero sin aditivos, presenta una menor trabajabilidad que los morteros con PCM, esto debido a que la arena utilizada contiene bajo contenido de finos, lo que da un mortero con baja trabajabilidad a pesar del agua incorporada. Esta característica de la arena ha favorecido el comportamiento del mortero, al menos en cantidades bajas de PCM, ya que las microcápsulas funcionan como finos, mejorando la trabajabilidad.

2.4.3.2 Densidad del mortero fresco y endurecido

La comparación entre las densidades teóricas y las obtenidas en el mortero fresco, en general dan diferencias aceptables, excepto en los morteros sin PCM, que como se explicó anteriormente presentan problemas de trabajabilidad, excepto el de mayor cantidad de cemento. La densidad del mortero baja a medida que se aumenta la cantidad de PCM (Tabla 9 y Gráfico 2), esto debido a que aumentan en el hormigón dos

materiales de menor densidad, como son el PCM y el agua. En el gráfico se puede ver el cambio de densidad desde un mortero sin PCM a una pasta de cemento y PCM. Este cambio de composición que se manifiesta a través del cambio de densidad, que afectan finalmente a la resistencia, pero también podría cambiar sus características térmicas, como las transmitancia térmica del material y el calor que es capaz de almacenar.

Tabla 9. Resultados promedios de densidades			
% de PCM	PCM promedio, kg	Densidad mortero fresco, kg/m ³	Densidad mortero endurecido, kg/m ³
0%	0	2.130	2.120
5%	100	2.020	1.960
10%	179	1.820	1.770
20%	293	1.470	1.460
34%	406	1.190	1.100

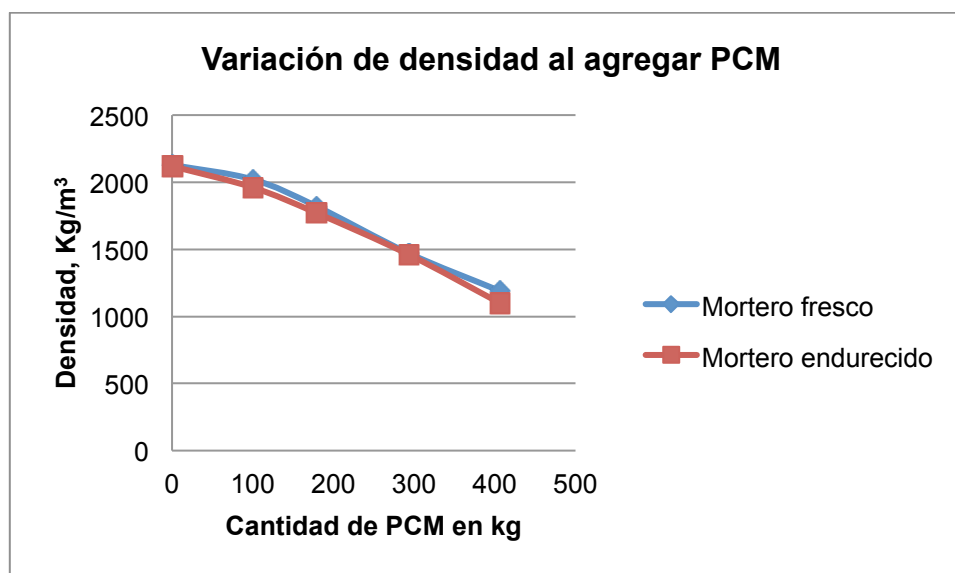


Gráfico 2. Variación de densidad al agregar PCM

2.4.3.3 Resistencias a compresión

Para analizar la resistencia a compresión, en primer lugar se hace una corrección a los morteros que no se ajustaron a la relación agua/cemento elegidas, se muestra una de las correcciones realizadas en Gráfico 3.

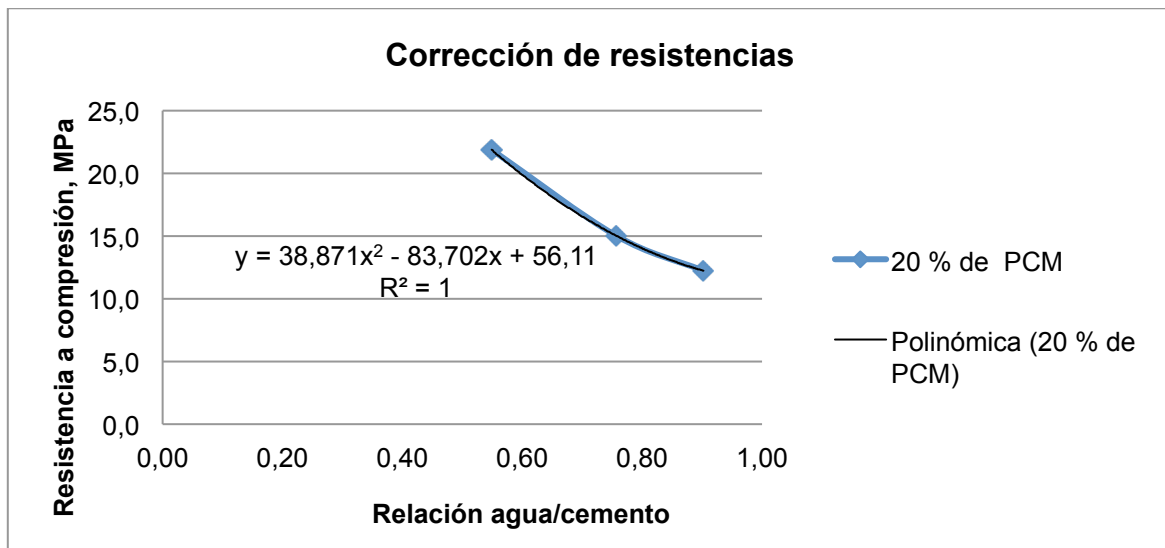


Gráfico 3. Corrección de resistencias

En la Tabla 10 se muestra las ecuaciones de regresión encontradas para la determinación de resistencia a partir de la relación agua/cemento. La Tabla 11, muestra los valores de resistencia a compresión promedio, corregida.

Tabla 10. Determinación de resistencia a partir de relación W/C		
PCM %	Cantidad PCM, en kg	Función para determinar resistencia
0	0	$R = 293,67x^2 - 496,14x + 223,66$
5	100	$R = 96,354x^2 - 179,11x + 97,269$
10	179	$R = 84,743x^2 - 145,84x + 76,804$
20	293	$R = 38,871x^2 - 83,702x + 56,11$
		R es la resistencia
		x es la relación agua/cemento

Tabla 11. Resistencias corregidas en kg/cm²				
% PCM	Cantidad PCM, kg	Relación agua/cemento		
		0,50	0,70	0,90
0	0	49,0	20,3	15,0
5	100	31,8	19,2	14,1
10	179	25,0	16,2	14,2
20	293	24,0	16,6	12,2

En los Gráficos 4 y 5 se muestra el comportamiento de la resistencia a compresión en función de la relación agua/cemento.

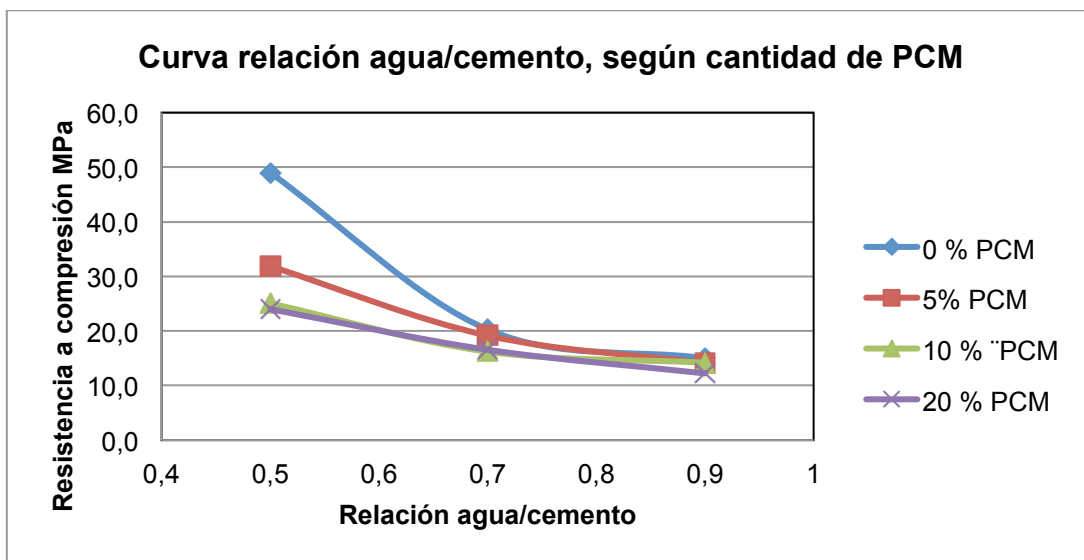


Gráfico 4. Curva de resistencia según relación agua/cemento para varios contenidos de PCM

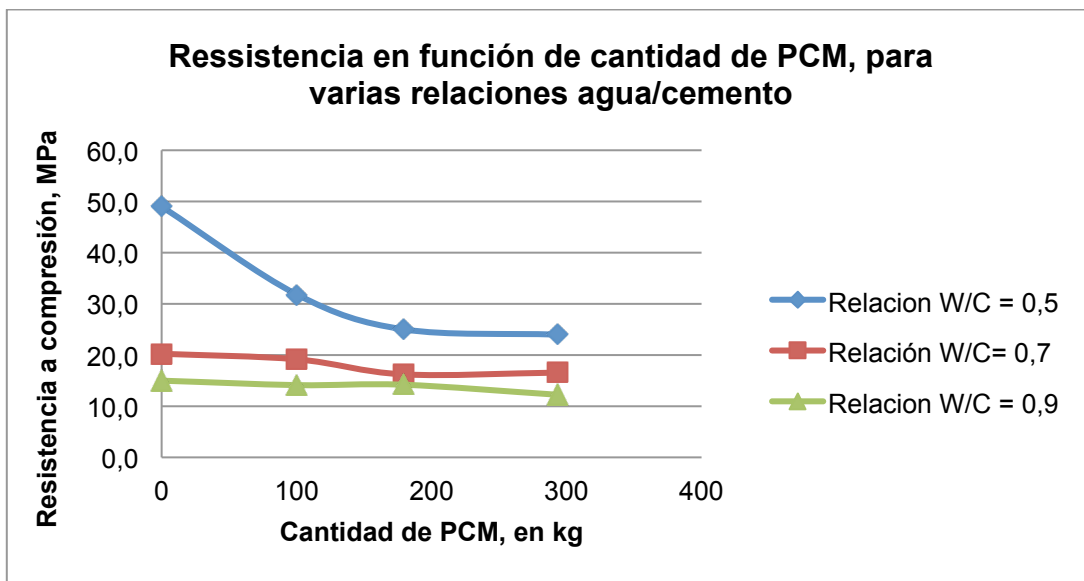


Gráfico 5. Curva de resistencia según cantidad de PCM, para varias relación w/c

En el Gráfico 5 se puede observar que hay diferencias en las curvas relación agua/cemento en función del porcentaje de PCM, pero esta diferencia se hace mínima en cantidades mayores a 20 %, y es menos evidente en relaciones agua/cemento mayores. Esto debido seguramente al bajo contenido de finos de la arena usada. Esto ratifica, que el uso de arenas sin finos es compensado en parte por las microcápsulas de PCM.

Se confirma el cambio de la resistencia obtenida en función del contenido de PCM. Sin embargo es posible conseguir resistencias sobre 20 MPa utilizando relaciones agua/cemento bajas.

Los gráficos obtenidos de las resistencias, más el gráfico de agua en relación al contenido de PCM, permite realizar dosificaciones preliminares de morteros modificados con PCM.

2.4.3.4 Ensayos tendientes a verificar rotura de microcápsulas

Se observa en microscopio óptico las partículas de PCM (Figura 2 izquierda) y posteriormente se agrega agua observándose como las partículas se hidratan (Figura 2 centro). Luego se agita la solución, comenzando la dispersión de las microcápsulas (Figura 2 derecha).

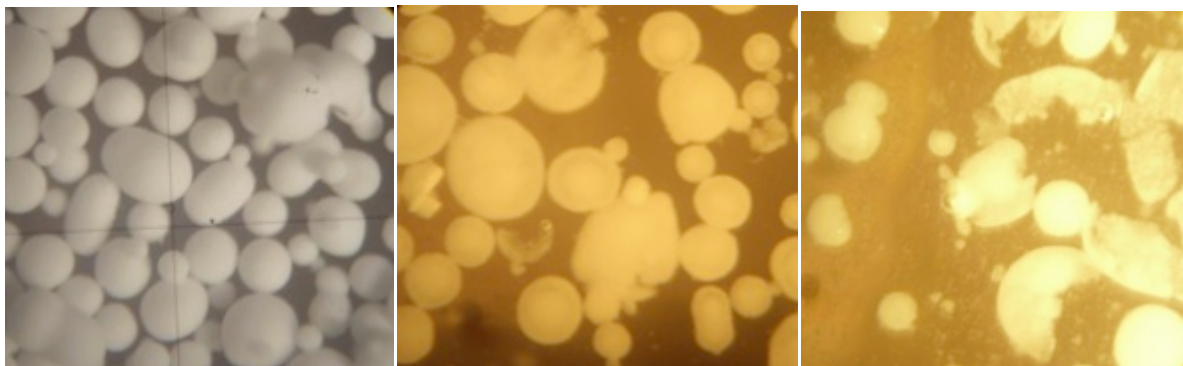


Figura 2. Microscopio óptico x50. Partículas de PCM sin hidratar (Izquierda). Partículas de PCM hidratadas (centro). Microcápsulas de PCM dispersándose (derecha)

Para verificar la rotura de microcápsulas se realizan las observaciones en el microscopio óptico de una muestra de PCM, obtenida de una mezcla de mortero de cemento y PCM, que se ha sometido a 3 min de revoltura (Figura 3, izquierda) y otras microcápsulas sin alterar (Figura 3, derecha), se puede ver que las microcápsulas tienen apariencia similar, lo que indica que no sufren roturas durante la mezcla.

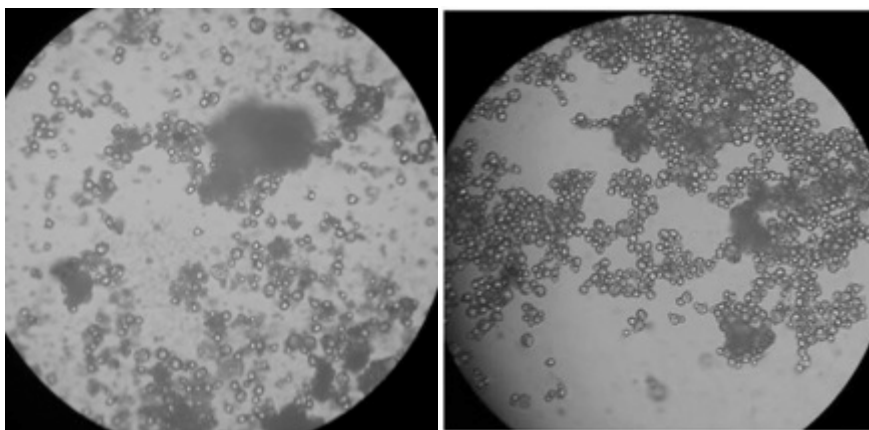


Figura 3. Microscopio óptico 400x. Microcápsulas de PCM recuperadas de mezcla (izquierda). Microcápsulas sin mezclar dispersas en agua (derecha).

2.4.3.5 Cantidad de microcápsulas de PCM posible de incorporar en la mezcla

Desde el punto de vista de las posibilidades físicas de incorporar PCM en morteros, el límite se fija cuando la cantidad de arena llega a cero. Este límite da como resultado la incorporación de una cantidad de alrededor de 400 kg de microcápsulas de PCM en polvo. Si bien esta es la cantidad que físicamente se puede incorporar en las mezclas, no significa que la mezcla desde el punto de vista de la trabajabilidad sea posible. Esta dependerá de una cantidad mínima de arena a incorporar para mejorar la trabajabilidad.

Se puede incorporar hasta 300 kg de PCM y obtener resistencias mayores a 20 MPa. Cantidades mayores de PCM se pueden incorporar en morteros de menor resistencia.

2.4.3.6 Almacenamiento de energía.

Respecto al almacenamiento de energía teórico posible de almacenar, se muestra en la Tabla 12. Se ve que para un gradiente de temperatura de 10 °C, con un 5 % de PCM, se incrementa un 34 % el almacenamiento, con un 10 % se aumenta un 66 % el almacenamiento, con un 20 % de PCM se aumenta un 93 % y con un 34 % se aumenta un 126 % el almacenamiento de energía. Se consideró el calor específico del mortero de 1,00 kJ/kg°C y no se considera el calor sensible del PCM.

Tabla 12. Acumulación de energía con PCM							
Muestra	PCM %	Relación agua/cemento	Peso materiales sin PCM, por m ³ , kg	Cantidad de calor sensible almacenado, considerando 10 °C de diferencia de T, kJ	Calor latente por PCM, (100 kJ/kg) kJ	Q total almacenado por m ³ , KJ	Acumulación respecto al mortero sin PCM %
M0(0,5)	0%	0,50	2150	21500	0	21500	100
M0(0,7)	0%	0,70	2150	21500	0	21500	100
M0(0,9)	0%	0,90	2150	21500	0	21500	100
M5(0,5)	5%	0,44	1904	19041	10209	29250	136
M5(0,7)	5%	0,70	1892	18919	9970	28889	134
M5(0,9)	5%	0,90	1884	18839	9913	28753	134
M10(0,5)	10%	0,50	1710	17100	18580	35680	166
M10(0,7)	10%	0,70	1710	17100	18580	35680	166
M10(0,9)	10%	0,90	1710	17100	18580	35680	166
M20(0,5)	20%	0,55	1330	13300	28100	41400	193
M20(0,7)	20%	0,76	1330	13300	28100	41400	193
M20(0,9)	20%	0,90	1330	13300	28100	41400	193
MSA(0,9)	34%	1,07	803	8028	40613	48642	226

Si se cambia el gradiente de temperatura se produce un cambio en la acumulación de energía, como se puede apreciar en el Gráfico 6 y Tabla 13. Se puede apreciar que la acumulación de energía por calor sensible es más eficiente en menores gradientes de temperatura. Los espesores de morteros se reducen al aplicarle PCM, de acuerdo a la cantidad incorporada.

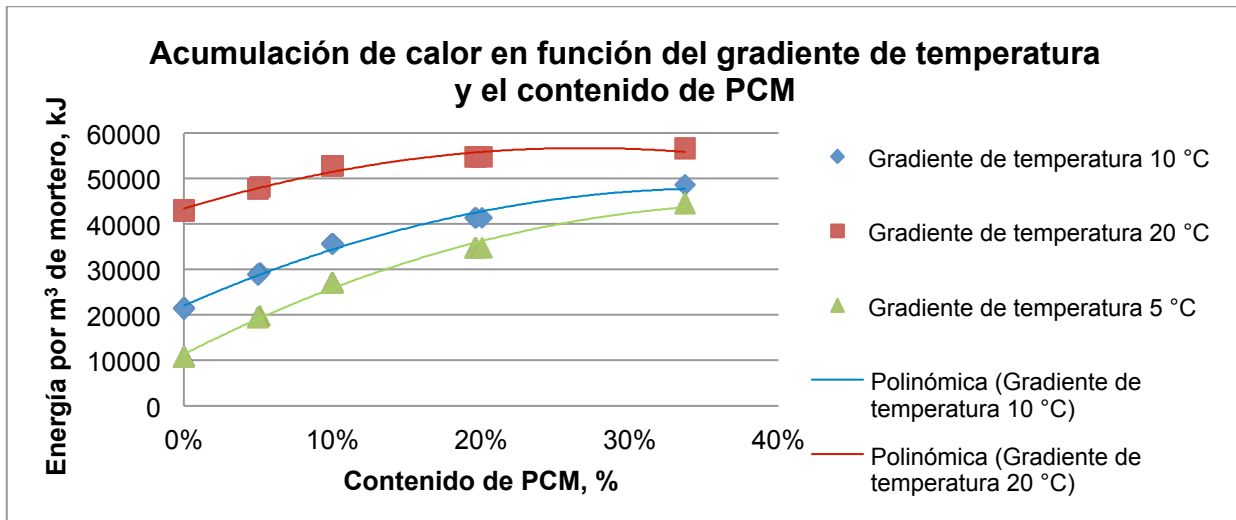


Gráfico 6. Acumulación de calor en función del gradiente de temperatura y el contenido de PCM

Tabla 13. Acumulación de energía respecto al mortero sin PCM y espesor de mortero que acumula igual cantidad de energía respecto a mortero sin PCM de 10 cm de espesor

% de PCM	Gradiente de temperatura 5 °C		Gradiente de temperatura 10 °C		Gradiente de temperatura 20 °C	
	Acumulación de energía respecto al mortero sin PCM %	Espesor del mortero respecto con igual energía acumulada cm	Acumulación de energía respecto al mortero sin PCM %	Espesor del mortero respecto con igual energía acumulada cm	Acumulación de energía respecto al mortero sin PCM %	Espesor del mortero respecto con igual energía acumulada cm
0%	100	10,0	100	10,0	100	10,0
5%	181	5,5	135	7,4	111	9,0
10%	252	4,0	166	6,0	123	8,1
20%	323	3,1	193	5,2	127	7,9
34%	415	2,4	226	4,4	132	7,6

7.- Conclusiones

- a) Hay disponible en el mercado PCM en microcápsulas con núcleo de parafina que pueden ser usados en control de temperaturas, desde el punto de vista energético como en la colocación de hormigones en masa.
- b) Se confirma que las microcápsulas producen problemas de trabajabilidad, requiriendo mayores cantidades de agua al aumentar el contenido de microcápsulas.
- c) Las microcápsulas en bajas proporciones mejoran la trabajabilidad de los morteros.
- d) La densidad disminuye en mayor medida, mientras mayor sea el contenido de microcápsulas incorporadas.
- e) La resistencia a compresión se ve afectada por la incorporación de las microcápsulas, sin embargo es posible lograr resistencias sobre 20 MPa en los morteros con cantidades de 20 % de PCM.
- f) Es posible aglomerar las microcápsulas con pasta de cemento obteniéndose resistencias a compresión de 8 MPa. Sin embargo deben evaluarse otras características que puedan influir en su comportamiento.
- g) La microscopia óptica representa una metodología útil para explorar el comportamiento de las microcápsulas en relación a verificar si se rompen durante la elaboración de la mezcla.
- h) Las observaciones mediante microscopio óptico no detectan el rompimiento de microcápsulas con 3 minutos de mezcla. Aunque será necesaria mayor experimentación para generar una metodología reproducible para confirmar lo observado.
- i) Al agregar parafinas microencapsuladas, se puede producir un aumento de acumulación de energía, dependiendo del gradiente de temperatura y la cantidad de PCM incorporado. Es más eficiente el almacenamiento de calor latente en gradientes menores.

8.- Bibliografía

AENOR, UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas, 2005.

AENOR, UNE-EN 197-1:2011, Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes, 2011.

AENOR, UNE-EN 1015-3 2000. Métodos de ensayos de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia de morteros fresco (por la mesa de sacudidas), 2000

AENOR, UNE-EN 1015-6 1999 / A1 2007. Métodos de ensayos de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco, 1999.

Bentz, D., & Turpin, R. (2007). Potential applications of phase change materials in concrete technology. *Cement Concrete Composites*, 29(7), 527-532.

Cabeza, L. F., Medrano Martorell, M., Castellón, C., Castell Casol, A., Solé, C., Roca Enrich, J., et al. (2007). *Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes* Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències i Tecnologia.

Felix, M., & Aguiar, J. (2009). *Study of a cement mortar with incorporation of PCM microcapsules*. SHANGHAI: TONGJI UNIV PRESS.

Hunger, M., Entrop, A. G., Mandilaras, I., & Founti, M. (2009). The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials. *Cement Concrete Composites*, 31(10), 731-743.

INN. NCh 2257/1. Of 96. Morteros - Determinación de la consistencia - Parte 1:Método del extendido en la mesa de sacudidas. 1996.

Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 379-391.

Lee, T., Hawes, D., Banu, D., & Feldman, D. (2000). Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 62(3), 217-237.

Mehling, H., & Cabeza, L. (2008). In Springer (Ed.), *Heat and cold storage with PCM. an up to date introduction into basic and applications*. Berlin:

Micronal ® PCM Intelligent Temperature Management for Buildings, BASF SE

Neila, F. J. (2004). • *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid: Munilla-Leira.

Oliver, A. (2009). Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibra de polipropileno. aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios. Universidad Politécnica de Madrid).

Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., Tyagi, S. K., & Akiyama, T. (2011). Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1373-1391.

Wang, Y., Shi, H., Xia, T. D., Zhang, T., & Feng, H. X. (2012). Fabrication and performances of microencapsulated paraffin composites with polymethylmethacrylate shell based on ultraviolet irradiation-initiated. *Materials Chemistry and Physics*, 135(1), 181-187.

Xin, W., YinPing, Z., Wei, X., RuoLang, Z., & Qunli, Z. (2009). Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope. *Chinese Science Bulletin*, 54(6), 920-928.

Zalba, B. (2002). Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. procedimiento experimental. universidad de zaragoza.

Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., & Di, H. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, 42(6), 2197-2209.